

## 랜덤 분포 구조의 분산 제어 광전송 링크에서 RDPS의 편차가 왜곡된 WDM 채널의 보상에 미치는 영향

# Effects of Deviations of RDPS on the Compensation for Distorted WDM Channels in Dispersion-Managed Optical Transmission Links of Random Distribution Schemes

이 성 렬

목포해양대학교 해양정보통신공학과

Seong-Real Lee

Department of Marine Information and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do 530-729, Korea

### [요 약]

분산 제어 (DM; dispersion management)와 광 위상 공액 기술이 결합된 전송 링크의 융통적 구성을 위해 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)이 랜덤하게 분포하는 링크에서 RDPS 편차에 따른 WDM 채널의 보상 특성을 살펴보았다. 또한 허용 가능 NRD (net residual dispersion) 관점에서 RDPS 편차에 따른 링크 설계 기준도 제시하였다. RDPS 편차가 적을수록 WDM 채널 보상 효과가 우수하다는 것을 확인하였다. 또한 특정 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 얻을 수 있는 허용 가능 NRD가 RDPS 편차에 비례하여 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과는 융통적인 장거리 광전송 링크 설계에 참고 자료가 될 것으로 기대한다.

### [Abstract]

The compensation characteristics of WDM channels depending on residual dispersion per spans (RDPS) deviation in optical links with the randomly distributed RDPS for the adaptive configuration are investigated in this paper. Also, the link design rule related with RDPS deviations is proposed, from the viewpoint of the allowable net residual dispersion (NRD). It is confirmed that the effect of compensation for the distorted WDM channels is more increased as RDPS deviation is smaller. Also, it is confirmed that the decrease of the allowable NRD range for the exact eye opening penalty (EOP) is proportional to RDPS deviation. Therefore, the results of this research is expected to be the design reference for the flexible link configuration of long-haul optical transmission links.

**Key word** : Dispersion management, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Net residual dispersion, RDPS deviation.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.2.147>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 31 March 2015; Revised 6 April 2015  
Accepted (Publication) 17 April 2015 (30 April 2015)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

## I. 서론

에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)에 의해 손실이 보상되는 광섬유에서 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)과 비선형성은 광통신 시스템의 대역폭 길이 곱 (bandwidth length product)을 제한하는 가장 중요한 요인이 된다. 그러나 단일 모드 광섬유 (SMF; single-mode fiber)의 주기적인 분산 보상을 통해 이러한 한계를 어느 정도 극복할 수 있다[1],[2]. 분산 보상, 또는 분산 제어 (DM; dispersion management)는 양의 분산 계수를 갖는 전송용 SMF에 음의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 추가적으로 배열하여 얻을 수 있다.

SMF에서 가장 미세한 비선형성 효과는 광 펄스의 강도에 비선형적으로 의존하는 광섬유의 굴절 계수에 의해 발생하는 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation)이다. 특히 한 채널의 데이터 전송률이 40 Gbps 이상의 초고속 파장 분할 다중 (WDM; wave-length division multiplexed) 시스템은 무어러 검출 (error-free detection)을 위해 큰 수신 전력을 요구하기 때문에 분산 보상 링크의 성능은 SPM과 GVD의 상호 작용에 의해 제한받는다.

WDM 전송 시스템에서 GVD와 SPM의 상호 작용에 의한 신호 왜곡을 줄여주는 또 다른 방법으로 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 적용하는 기술이 있다[3],[4]. 이 기술은 국부 분산 (local dispersion)과 광 신호 전력이 OPC를 중심으로 대칭적으로 분포하여야 GVD와 SPM의 상호 작용에 의한 신호 왜곡을 보상할 수 있다. 하지만 장거리 전송 시스템에서는 광섬유의 손실 때문에 국부 분산과 광 전력의 완벽한 대칭을 얻기 어렵다는 이유로 기술 적용 면에서 한계가 있었다.

그러나 다행스럽게도 DM과 OPC를 전송 링크에 동시에 적용하면 이 두 가지 문제를 어느 정도 개선할 수 있다고 최근 다양한 연구를 통해 보고되고 있다[5]-[7].

본 논문의 저자도 DM과 OPC를 전송 링크에 적용한 그간의 연구들을 통해 WDM 채널을 고품질로 장거리 전송할 수 있다는 것을 밝힌 바 있다[8]-[10]. 특히 광 신호 보상을 위해 DM과 OPC를 적용하는 경우 링크 구조가 고정되어야 한다는 기술적 한계를 중계 구간 (fiber span)을 구성하는 SMF 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 랜덤하게 분포시킴으로써 극복될 수 있다는 것을 확인하였다[9],[10].

그러나 RDPS 분포가 랜덤한 전송 링크의 실제적 적용을 위해서는 해결해야 할 세부적인 문제들이 존재한다. 그 중 링크 간 RDPS 편차 (deviation)가 WDM 채널 보상에 미치는 영향을 분석하여, 그 결과를 실제 링크 설계에 반영하여야 한다.

본 연구에서는 중계 구간을 구성하는 SMF의 길이가 80 km로 고정된 반면 RDPS가 랜덤하게 분포하는 링크에서

RDPS 편차에 따른 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호의 보상 특성을 살펴보고자 한다. 본 연구에서 고려한 RDPS 편차는 10 ps/nm, 20 ps/nm, 50 ps/nm와 100 ps/nm의 4가지이다. RDPS 편차에 따른 성능 개선 정도를 좀 더 객관적으로 살펴보기 위하여 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 일정한 링크에서의 WDM 채널 성능과 비교 분석하였다.

## II. WDM 전송 시스템과 광전송 링크의 구성

그림 1은 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 24 개 송신기(Tx) 각각은 중심 파장을 1,550 nm부터 1,568.4 nm까지 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 갖는 분포 제환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LD는 서로 독립적인 128(=2<sup>7</sup>) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ를 발생시키는 것으로 모델링하였다.

수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 × 비트율로 가정하였다.

전체 전송로 중간에 위치한 OPC는 HNL-DSF(highly nonlinearity – dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였고, 그 세부 구성과 파라미터 값은 저자의 DM 관련 논문과 동일하게 모델링하였다[9],[10].

표 1에 링크를 구성하는 SMF와 DCF의 파라미터 값들을 나타냈다. 즉 그림 1의 전송 링크에서 SMF는 모든 파라미터 (길이, 손실 계수, 분산 계수, 비선형 계수)가, DCF는 길이를 제외한 모든 파라미터가 모든 중계 구간에서 동일하도록 하였다. DCF 길이는 각 중계 구간의 RDPS 편차 (dev)에 따라 표 1과 같은 6개의 값들이 반 중계 구획에서 랜덤하게 선택되도록 하였다. 예를 들어, 각 중계 구간의 RDPS 편차가 10 ps/nm로 설정된 링크의 경우 전반 전송 구획 (FHS; former half section)과 후반 전송 구획 (LHS; latter half section) 각각에서 첫 번째 중계 구간과 마지막 중계 구간을 제외한 나머지 6개 중계 구간의 DCF 길이는 11.85 km, 11.95 km, 12.05 km, 12.15 km, 12.25 km, 12.35 km 중 하나로 랜덤하게 선택되도록 하였다.

랜덤 분포에서 제외되는 첫 번째 중계 구간과 마지막 중계 구간의 DCF 길이는 전체 링크의 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)에 따라 변화하도록 하였다. 즉 precompensation으로 NRD를 결정하는 구조에서는 마지막 중계 구간의 DCF 길이를 통해 LHS의 전체 잉여 분산을 0 ps/nm로 설정하도록 하고, 식 (1)에 의해 NRD 값에 따라 첫

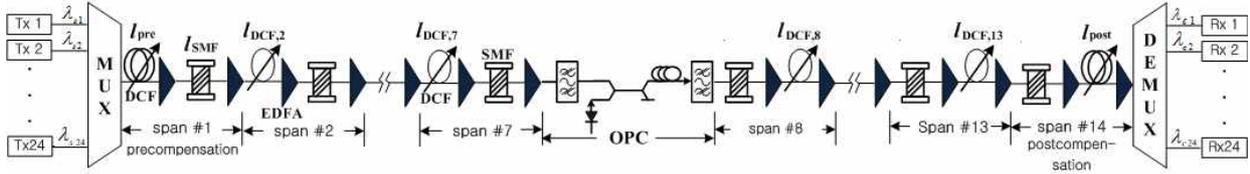


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

표 1.  $\Delta RD = 10$  ps/nm를 위한  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$

Table 1.  $l_{pre}$  and  $l_{post}$  for  $\Delta RD = 10$  ps/nm.

| Parameters | SMF            |                                     | DCF            |  |
|------------|----------------|-------------------------------------|----------------|--|
|            | Symbol         | Values                              | Symbol         | Values   |
| 손실 계수      | $\alpha_{SMF}$ | 0.2 dB/km                           | $\alpha_{DCF}$ | 0.6 dB/km  |
| 분산 계수      | $D_{SMF}$      | 17 ps/nm/km                         | $D_{DCF}$      | -100 ps/nm/km  |
| 비선형 계수     | $\gamma_{SMF}$ | $1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ | $\gamma_{DCF}$ | $5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  |
| 길이         | $l_{SMF}$      | 80 km                               | $l_{DCF,n}$    | dev 10    11.85-12.35 km ( $\Delta = 0.1$ km)<br>dev 20    11.6-12.6 km ( $\Delta = 0.2$ km)<br>dev 50    10.6-13.6 km ( $\Delta = 0.5$ km)<br>dev 100    9.1-15.1 km ( $\Delta = 1.0$ km) |

번째 중계 구간의 DCF 길이가 결정되도록 하였다. 또한 postcompensation으로 NRD를 결정하는 구조에서는 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이를 통해 FHS의 전체 잉여 분산을 0 ps/nm로 설정하도록 하고, 식 (2)에 의해 NRD 값에 따라 마지막 중계 구간의 DCF 길이가 결정되도록 하였다.

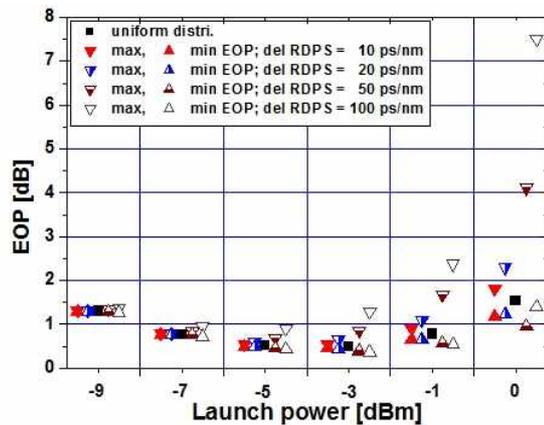
$$l_{pre} = \frac{\left( \sum_{n=2}^7 RDPS_n + l_{SMF} \times D_{SMF} \right) - NRD}{|D_{DCF}|} \quad (1)$$

$$l_{post} = \frac{\left( \sum_{n=8}^{13} RDPS_n + l_{SMF} \times D_{SMF} \right) - NRD}{|D_{DCF}|} \quad (2)$$

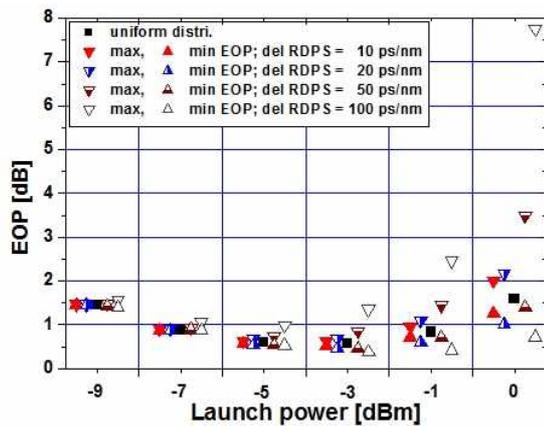
광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[11]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

precompensation과 postcompensation으로 결정하는 최적 NRD는 저자의 다른 연구에서와 같이 각각 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 얻어졌다. 그림 2(a)와 (b)는 precompensation과 postcompensation에 의해 NRD가 각각 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 광전송 링크를 통해 24 채널 WDM 신호를 전송한 경우 최



(a) precompensation



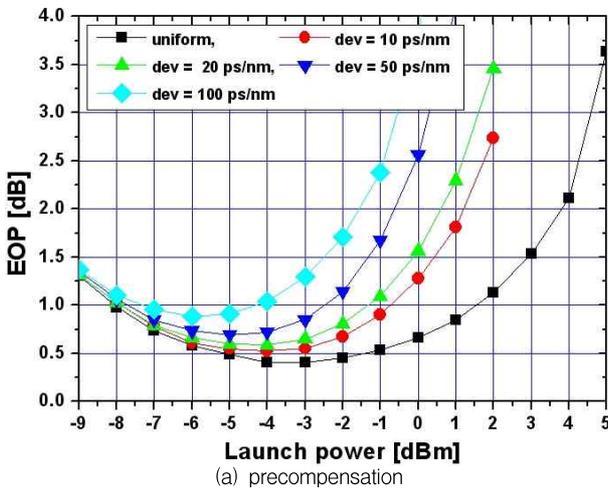
(b) postcompensation

그림 2. 입사 전력에 따른 RDPS 편차별 최악 채널의 EOP  
 Fig. 2. The EOP of the worst channel as a function of the launch power.

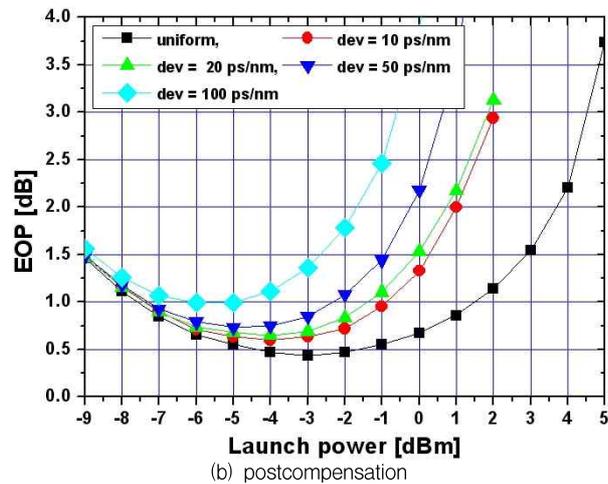
악 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 랜덤 분포하는 RDPS의 편차에 대한 보상 특성을 살펴보기 위하여 그림 2에 본 논문에서 고려한 4가지 편차에 따른 EOP와 모든 중계 구간의 RDPS가 150 ps/nm (랜덤 RDPS 값의 구간 평균 값임)로 균일한 링크에서의 EOP (그림 2에서 "uniform distri.")도 동시에 나타냈다.

본 연구에서는 4가지 RDPS 편차의 모든 경우에서 랜덤 분포 패턴을 30번 발생시켰다. 특정한 RDPS 분포 패턴에 따라 최대 EOP (최악 EOP)와 최소 EOP (최선 EOP)를 얻을 수 있는데 그림 2는 RDPS 편차별로 이 두 EOP를 동시에 나타낸 것이다.

그림 2를 살펴보면 입사 전력이 증가할수록 균일 분포에서의 EOP와의 차이가 심해지는 것을 알 수 있다. 즉 RDPS가 랜덤하게 분포하는 링크에서는 입사 전력이 증가할수록 균일 분포 링크에 비해 수신 성능이 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 입사 전력에 대해서도 RDPS 편차가 큰 랜덤 분포 링크일수록 EOP 차이 (랜덤 패턴에 따른 최대 EOP와 최소 EOP 차이)가 심해지는 것을 확인할 수 있다.



(a) precompensation

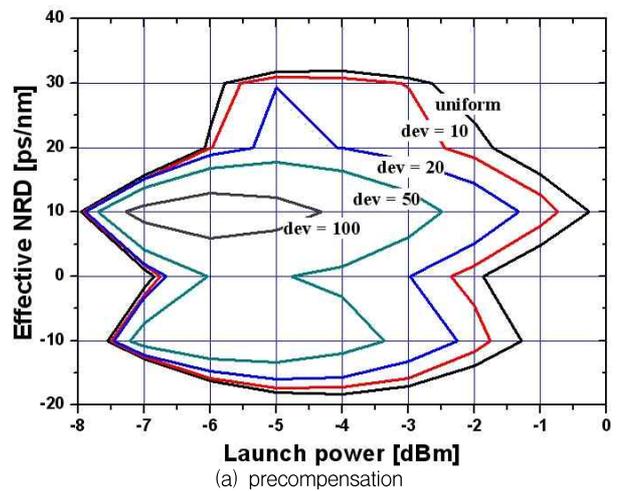


(b) postcompensation

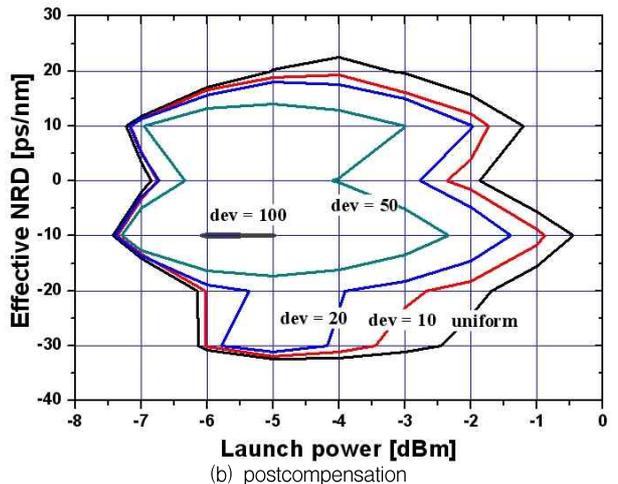
그림 3. 입사 전력에 따른 RDPS 편차별 최대 EOP  
 Fig. 3. The maximum EOP of each RDPS deviations versus the launch power.

그림 3은 최악 채널의 최대 EOP를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 수신측 성능 기준을 1 dB EOP라고 한다면 RDPS 분포가 균일하고 precompensation와 postcompensation에 의해 NRD가 각각 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 전송 링크의 유효 입사 전력 범위는 각각 -8 ~ -1.5 dBm이고 -7.6 ~ -1.5 dBm로 얻어지는 반면 RDPS 분포가 랜덤한 링크에서 RDPS 편차가 증가할수록 유효 입사 전력 범위가 줄어드는 것을 알 수 있다. 최악의 경우는 RDPS 편차가 100 ps/nm인 경우로 precompensation과 postcompensation에 따라 최적 NRD로 설정된 링크에서 각각 -7.3 ~ -4.2 dBm이고 -6 ~ -5 dBm의 유효 입사 전력 범위를 갖는다.

지금까지의 성능 분석은 NRD가 precompensation과 postcompensation에 의해 각각 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 광전송 링크에서 이루어졌다. 하지만 실제적으로 전송 링크의 NRD를 항상 이 값을 갖도록 고정하는 것은 시스템 구성의 융통성을 제한하는 요소가 된다. 다행히도 10 ps



(a) precompensation



(b) postcompensation

그림 4. 입사 전력에 따른 1 dB EOP 등고선  
 Fig. 4. The contour of 1 dB EOP as a function of the launch power.

/nm이나 -10 ps/nm 외에 이들 근처의 다른 NRD 값들을 링크에 적용해도 최악 채널의 최대 EOP를 1 dB EOP 이하로 유지할 수 있다. 즉 수신 성능을 1 dB EOP 이하로 만드는 각 경우의 NRD 범위를 구할 수 있고 이 범위 내의 특정 값으로 NRD가 유지되도록 링크 구조를 설계하면 시스템 구조의 유연성을 높일 수 있다. EOP를 1 dB 이하가 되게 하는 NRD 범위를 유효 NRD라고 정의하여 이들을 WDM 채널의 입사 전력에 따라 구한 것이 그림 4이다.

즉 그림 4의 각각의 경우에 나타난 입사 전력에 따른 등고선(contour)의 범위 내에서 NRD를 선택하고 해당 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송하면 최악 채널의 최대 EOP를 1 dB 이내로 얻을 수 있다.

그림 4를 통해 알 수 있는 것은 앞선 결과와 마찬가지로 1 dB EOP 이하의 수신 성능을 얻을 수 있는 유효 NRD 범위는 RDPS 편차가 커질수록 좁아지고 그 입사 전력 크기도 줄어든다는 것이다. 수신 신호의 EOP 기준을 1 dB가 아닌 다양한 값에서도 유효 NRD 범위와 유효 입사 전력 범위를 구할 수 있는데 그 결

과를 상대적으로 나타낸 것이 그림 5이다. 그림 5에서 x축은 얻고자 하는 EOP 등고선 값이다. 그림 5는 동일한 허용 가능 총 NRD 범위에 대한 RDPS 편차에 따른 EOP 변화 정도를 찾을 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들어 만일 중계 구간의 RDPS 편차가 100 ps/nm가 되고 이들이 랜덤하게 분포하는 WDM 전송 시스템에서 허용 가능한 총 NRD 범위를 300 ps/nm로 하는 경우는 RDPS 분포가 균일한 경우에 비해 EOP가 약 0.75 dB 정도 저하된다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

DM과 MSSI 기술이 적용된 WDM 전송 링크의 융통적 구성에 필요한 RDPS 분포를 랜덤하게 분포시키는 구조에서 RDPS 편차에 따른 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성을 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

RDPS 편차가 적을수록 WDM 채널의 보상 효과가 증대되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 허용 가능 전체 NRD 관점에서 RDPS 편차를 고려한 링크 설계 기준을 제시하였다. 그러나 RDPS 편차가 적다는 것은 DM 적용 링크의 분산 분포가 전통적으로 사용했던 균일 분포와 크게 다르지 않다는 것을 의미하기 때문에 RDPS 편차가 증가하여도 WDM 채널의 보상에 효과가 있는 설계 기술을 개발하여야 한다. 따라서 향후 연구에서는 RDPS 편차가 큰 장거리 전송 링크에서의 DM과 OPC 링크의 구성 기술을 연구하고자 한다.

참고 문헌

- [1] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038~2044, May 2006.
- [2] I. E. Araci1, S. Vorbeck, M. Schneiders, M. J. Ansari, N. Peyghambarian1 and F. Kueppers1 "System optimization and significant reach extension using alternating dispersion compensation for 160 Gbit/s transmission links," *Optics Express*, Vol. 13, No. 17, pp. 6336~6344, 2005.
- [3] S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spälter, G.-D. Khoe, "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 505~520, 2006.
- [4] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 3, pp 243~248, 1996.

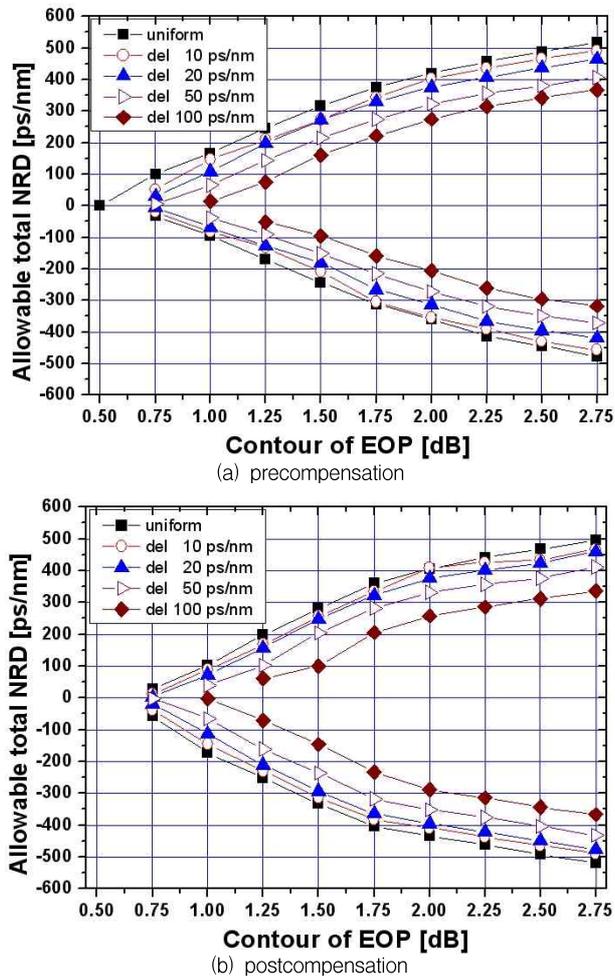


그림 5. EOP 등고선 대 허용 가능 전체 NRD  
Fig. 5. The contour of EOP versus the allowable total NRD.

- [5] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letter*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.
- [6] X. Xiao, C. Yang, S. Gao, and Y. Tian, "Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry," *Optical Communication*, Vol. 265, No. 1, pp. 326-330, 2006.
- [7] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [8] S. R. Lee, "Dispersion management and optical phase conjugation in optical transmission links with a randomly distributed single-mode fiber length," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 1~6, 2013.
- [9] S. R. Lee, "Compensation characteristics of distorted WDM signals depending on distribution patterns of SMF length and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 158~164, 2014.
- [10] H. B. Yim and S. R. Lee, "Flexible optical links with dispersion management and optical phase conjugation," *International Journal of Software Engineering and Its Application*, Vol. 8, No. 4, pp. 213~222, April 2014.
- [11] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.



**이 성 렬 (Seong-Real Lee)**

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사), 1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)  
2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사), 2002년 6월~2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장  
2004년 3월~현재 : 국립목포해양대학교 해양정보통신공학과 부교수  
※관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송